

Fondamenti di Elettronica

Docente: Chiara GUAZZONI

Esercitatore: Giulia Acconcia, 30 ore, le restanti C. Guazzoni

Resp. Lab Pspice: Dino Ghilardi

Ricevimento in presenza in via Golgi 40 o via Webex

WEN Giovedì' 14:45 – 16:45 (OK?)

W ↘ *Dip. di Elettronica, Informazione e Bioingegneria*
W Ed. 24, Secondo Piano, Stanza 2.04, Via Golgi 40

W HERE ✉ Chiara.Guazzoni@polimi.it
Subject: Fondamenti di Elettronica

☎ 02 2399 6147

AA 2023/2024

ORARIO DELLE LEZIONI a.a. 23/24

□ lezioni/esercitazioni

Giorno	Ora		Aula
Lunedì	10:15 - 13:15 10:30 - 13	3 ore	Aula T.2.2
Martedì	10:15 - 13:15 10:30 - 13	3 ore	Aula 2.0.2
Mercoledì	10:15 - 12:15 10:30 - 12	2 ore	Aula 2.1.4
Alcuni Giovedì	Laboratorio oppure recupero online		online o G.0.1 & G.0.2

Webex Personal Room
Registrazioni disponibili
Google Calendar:

<https://tinyurl.com/yc8dmedx>



ORARIO DELLE LEZIONI a.a. 23/24

□ PROVA FINALE SIMULAZIONI SPICE DI CIRCUITI ELETTRONICI - modalita' di erogazione solo online tranne 2

Giorno & Ora	Argomento
Giovedì 7 marzo 9:00-11:30	Introduzione a pSpice e Simulazione pSpice di circuiti RC e Partitore Compensato (risposta all'onda quadra e funzione di trasferimento).
Giovedì 14 marzo 9:00-11:30	Simulazione pSpice della caratteristica di un diodo e di un raddrizzatore a singola o doppia semionda
Giovedì 21 marzo 9:00-11:30	Simulazione pSpice del comportamento statico e dinamico di un invertitore CMOS
Giovedì da definire	Stadio amplificante a singolo transistor in configurazione source a massa, con degenerazione di source e source follower
Giovedì 17 e 24 maggio 9:00-11:30	Simulazione pSpice di configurazioni circuitali basate su amplificatori operazionali (filtro passa-banda, integratore e generatore di forme d'onda)

ORARIO DELLE LEZIONI a.a. 23/24

LABORATORIO del corso FONDAMENTI DI ELETTRONICA

3ore + 3ore
aprile/maggio
9:30-12:30

Stadio amplificante a singolo transistor in configurazione source a massa, con degenerazione di source e source follower
SPERIMENTALE IN PRESENZA

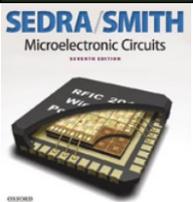
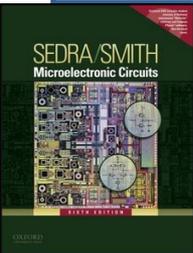
ORARIO DELLE LEZIONI a.a. 23/24

NEW!!

TUTORATO DI FONDAMENTI DI ELETTRONICA 15 ore

- **SPERIMENTALE IN PRESENZA IN LABORATORIO**
- numero partecipanti limitato alla capienza delle aule G01 e G02
- da aprile, dopo P.I.? - in orario da definire: *Giovedì pomeriggio???*
- Tramite la realizzazione di semplici stadi amplificanti a singolo transistor, circuiti a diodi, stadi con amplificatori operazionali, circuiti RC si ripercorrono i concetti affrontati nel corso.
- La modalità laboratoriale a piccoli gruppi consente agli studenti e alle studentesse di lavorare insieme, confrontarsi, giungere insieme ad obiettivi condivisi, apprendendo in aggiunta l'uso dei principali strumenti propri della materia (multimetro, oscilloscopio, generatore di forme d'onda).
- Ciascuna esperienza è guidata da una traccia che descrive le principali misure da effettuare e come procedere.
- A ciascun gruppo è lasciata la scelta se realizzare diversi circuiti nei diversi incontri o approfondirne uno per tutta la durata del percorso di tutorato.

LIBRO DI TESTO E PAGINA WEB



FONDAMENTI DI ELETTRONICA - a.a. 2012/2013
Prof. Chiara GUAZZONI

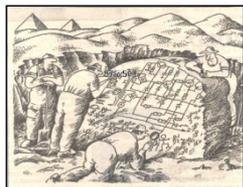
Sedra/Smith, Microelectronics Circuit, 5th or 6th edition o 7th edition or 8th edition, Oxford University press

(alcuni materiali sono presenti solo sul sito <https://learninglink.oup.com/search/sedra>)

Esiste anche la versione italiana:

Sedra/Smith, "Circuiti per la microelettronica", EdiSES, 2005, 2012, 2019

<https://guazzoni.faculty.polimi.it/fde/>



Richard Jaeger and Travis Blalock, Microelectronic Circuit Design, Mc Graw Hill <http://www.jaegerblalock.com/> (per consultazione)



MODALITA' D'ESAME - I

L'esame consta di una **prova scritta** e di una **prova orale** (a discrezione del docente).

Sono, inoltre, previste, in sostituzione della sola prova scritta, **2 prove in itinere**, costituite da compito scritto con esercizi anche numerici:

* **PR1**: nel periodo di sospensione delle lezioni (dopo Pasqua) e verte sul programma svolto fino a quella data - sara' possibile che la prova sia suddivisa in due parti, di cui una obbligatoria per il superamento della prova. (dovrebbe essere il 15 aprile 2024 alle 15:00)

* **PR2**: al termine delle lezioni del 2° semestre e puo' verte sull'intero programma (dovrebbe essere il 18 giugno 2024 alle 8:00)

L'orale per coloro che hanno superato le prove in itinere potra' avvenire prima del 1° appello, in modo da garantire l'eventuale partecipazione all'appello.

MODALITA' D'ESAME - II

PR 1	PR 2		ORALE	ESITO
POS	POS	Accede all'eventuale orale	POS	Approvato
			NEG	Recupera tutto
POS	NEG	Non ammesso orale	NO	Recupera tutto
NEG	NO	Non ammesso PR 2	NO	Recupera tutto

⇒ L'esame e' superato se viene raggiunta la sufficienza sia nella prova scritta che nella eventuale prova orale.

MODALITA' D'ESAME - III

Sono, inoltre, previsti **4 (+2)* appelli d'esame** (che constano di una prova scritta e di un'eventuale prova orale a discrezione del docente) **sull'intero programma del corso a luglio (1), settembre (1) e gennaio/febbraio (2)** per coloro che devono recuperare o intendono migliorare (o peggiorare!) il voto già ottenuto.

Le date per l'estate 2024 - anche se non ancora definitive - dovrebbero essere:



- 18 giugno 2024
- 15 luglio 2024.

*** i 2 appelli aggiuntivi** indicati derivano dalle seguenti **aggiunte, a mia discrezione, non previste dalla Scuola:**

- **appello straordinario in contemporanea con la prima prova in itinere** per coloro che **NON** stanno frequentando per la prima volta il corso,
- **appello 0° durante la seconda prova in itinere per tutti** coloro che lo desiderino (chi non ha superato la prima prova in itinere o l'appello straordinario, chi ha superato la prima prova in itinere, ma non è soddisfatto del voto e vuole fare l'intero appello, ...)

MODALITA' D'ESAME - IV

- ⇒ La prova scritta consta di un totale di 10 domande, suddivise in 2, 3 o 4 esercizi. Ogni domanda vale 1 punto. La soglia per superare la prova scritta e' di 5/10 punti. La corrispondenza tra punti e voto in trentesimi e' lineare secondo una scala che assegna 18/30 a 5/10 punti e 33/30 (30 & lode) a 10/10 punti (retta con equazione $\text{Voto} = 3 \text{ punti} + 3$).
- ⇒ Per la sola prima prova in itinere, la prova e' considerata superata anche con esito pari a 17/30, in tal caso e' obbligatorio ottenere almeno 19/30 nella seconda prova in itinere cosicche' la media delle due prove sia almeno pari a 18/30.
- ⇒ La prova orale, se superata, puo' variare il voto dello scritto di $\pm 5/30$.
- ⇒ NON si puo' ottenere la lode se non si sono effettuati i laboratori con frequenza almeno pari al 75%

MODALITA' D'ESAME - V

DALL'ANNO ACCADEMICO 2017/18:

- ✓ **Non e' necessario sostenere la prova orale in corrispondenza della prova scritta, ma puo' essere sostenuta in date prefissate, circa con cadenza mensile.**
- ✓ **La prova scritta - se superata - ha validita' di un anno accademico, fino all'ultimo appello di Febbraio 2025, ma consente una sola partecipazione all'orale.**

CONOSCENZE DI BASE...

...DATE PER ACQUISITE!

- ✓ Leggi di Kirchhoff
- ✓ Equivalente Thevenin e Norton
- ✓ Concetto di impedenza - Reti in regime sinusoidale
- ✓ Reti elementari in regime transitorio: circuito RC e CR, risposta al gradino....

→ *senza queste e' impossibile superare l'esame di Fondamenti di Elettronica*

PROGRAMMA DEL CORSO - PARTE I

9+1 Crediti = 10 Crediti

1. Sistemi Elettronici

1.1 Segnali: generatori e sensori reali. Rappresentazione nel tempo e componenti in frequenza.

1.2 Richiami di Elettrotecnica: partitore di tensione e di corrente, circuiti RC e CR...

2. Dispositivi Elettronici

2.1 Generalità sui semiconduttori: droganti, portatori.

2.2 Diodo: principio di funzionamento, caratteristiche statiche ideali, impiego come raddrizzatore.

2.3 Transistore MOS: principio di funzionamento, caratteristiche statiche ideali, impiego come interruttore.

3. Elettronica Digitale

3.1 Inverter CMOS: prestazioni statiche e dinamiche, margini di rumore.

3.2 Porte Logiche CMOS: prestazioni statiche e dinamiche.

4. Elettronica Analogica

4.1 Transistore MOS: impiego come amplificatore. Stadi elementari.

----- **SOSPENSIONE LEZIONI e PRIMA PROVA IN ITINERE** -----

PROGRAMMA DEL CORSO - PARTE II

4. Elettronica Analogica

4.2 Stadi differenziali a MOS e specchi di corrente.

4.3 Amplificatori operazionali (OA): caratteristiche ideali e deviazioni dall'idealità, funzionamento lineare; comparatore.

4.4 Reazione negativa: concetto di terra virtuale, configurazioni invertente e non invertente.

4.5 Circuiti con OA reali per la somma, la differenza, l'integrazione, la derivazione e il filtraggio di forme d'onda

5. Conversione Analogica/Digitale

5.1 Generalità sul campionamento: criteri di ricostruzione, spettro ed equivocazione.

5.2 Sample&Hold: struttura circuitale, parametri e non idealità.

5.3 Cenni di convertitori DAC: esempi di struttura interna, errori e non-linearità.

5.4 Convertitori ADC: esempi di struttura interna, quantizzazione, risoluzione, precisione ed accuratezza.



Regolamento Integrativo della Prova Finale di Laurea e di Laurea Magistrale

POLITECNICO DI MILANO

SCUOLA
DI
INGEGNERIA INDUSTRIALE E DELL'INFORMAZIONE

TITOLO I: PROVE FINALI DI LAUREA

Consiglio di Corso di Studio in Ingegneria Elettronica

Cap. I.1 – Tipologie della Prova Finale – Operazioni Preliminari alla Prova Finale

Art. I.1.1 – Tipologie della Prova Finale (Rif. RPF, Art. II.1.1, II.1.2, II.1.3)

La Prova Finale per il conferimento della Laurea consiste:

- Per gli Allievi 509, nella presentazione e discussione di un Elaborato (Prova Finale di tipo α).
- Per gli Allievi 270, nel superamento degli esami degli insegnamenti indicati nel Manifesto degli Studi come “Prova Finale” (Prova Finale di tipo β).

Art. I.2.2 – Allievi 270: Valutazione delle Attività e della Carriera – Assegnazione dell'Incremento di Voto (Rif. RPF, Art. II.2.6, II.2.7)

L'incremento I , in punti centodecimali, è calcolato con la formula

$$I=1+M/6,$$

dove M è la media aritmetica - in trentesimi e senza considerare le lodi - delle votazioni conseguite negli esami degli insegnamenti indicati nel Manifesto degli Studi come “Prova Finale”.

Non è prevista l'assegnazione dell'incremento eccezionale.

Esempio: media dei 3 esami = 18 \rightarrow $I=4$; media = 30 \rightarrow $I=6$

DEFINIZIONE DI ELETTRONICA

Il termine **elettronica** fu introdotto intorno al 1940 per indicare quella parte della scienza elettrica dedicata allo studio dei fenomeni associati al moto di fasci di elettroni nel vuoto e nei gas (*American standard definition of electrical terms, 1941*). (fonte Treccani online)

Elettronica

Tecnologia di elaborazione delle informazioni basata sul trattamento dei segnali di tipo elettrico.

Elettronica

Scienza che si occupa dell'acquisizione, elaborazione e trasmissione dell'informazione con segnali elettromagnetici.

Elettronica

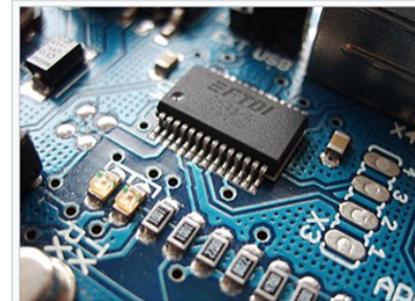
Da Wikipedia, l'enciclopedia libera.



WIKIPEDIA
L'enciclopedia libera

L'**elettronica** è la scienza e la tecnica concernente l'emissione e la propagazione degli elettroni nel vuoto o nella materia; in quanto scienza è una branca della fisica, in particolare dell'elettrologia: nata come branca dell'elettrotecnica è oggi intesa come disciplina a sé, e può essere definita come "tecnica delle correnti deboli e di alta frequenza" differendo dall'elettrotecnica che è invece "la tecnica delle correnti forti e di bassa frequenza".^[1]

Più specificatamente l'elettronica è l'insieme delle conoscenze metodologiche, teoriche e pratiche utilizzate per la progettazione e realizzazione di sistemi e apparati hardware in grado di elaborare grandezze fisiche sotto forma di segnali contenenti informazione, per svariati tipi di applicazioni; le realizzazioni dell'elettronica sono quindi dei circuiti elettronici di elaborazione costituiti da componenti elettronici, attivi e passivi, collegati a mezzo di fili o tracciati conduttivi, in genere metallici, attraverso cui circolano correnti elettriche; di tale ambito si occupa l'ingegneria elettronica.



Particolare di una scheda elettronica Arduino. Sul circuito stampato sono visibili vari componenti

**Elettronica: scienza e tecnologia del controllo degli elettroni,
intesa come studio del moto degli elettroni**



The World Without Engineers



Agilent Technologies

<http://www.educatorscorner.com>



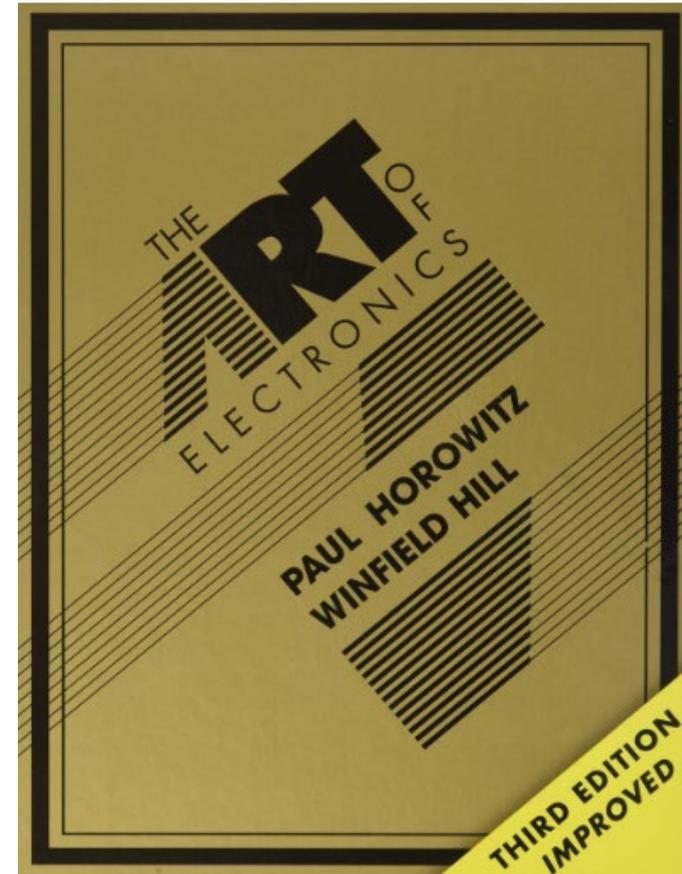
C. Guazzoni, Fondamenti di Elettronica

Il mio augurio...

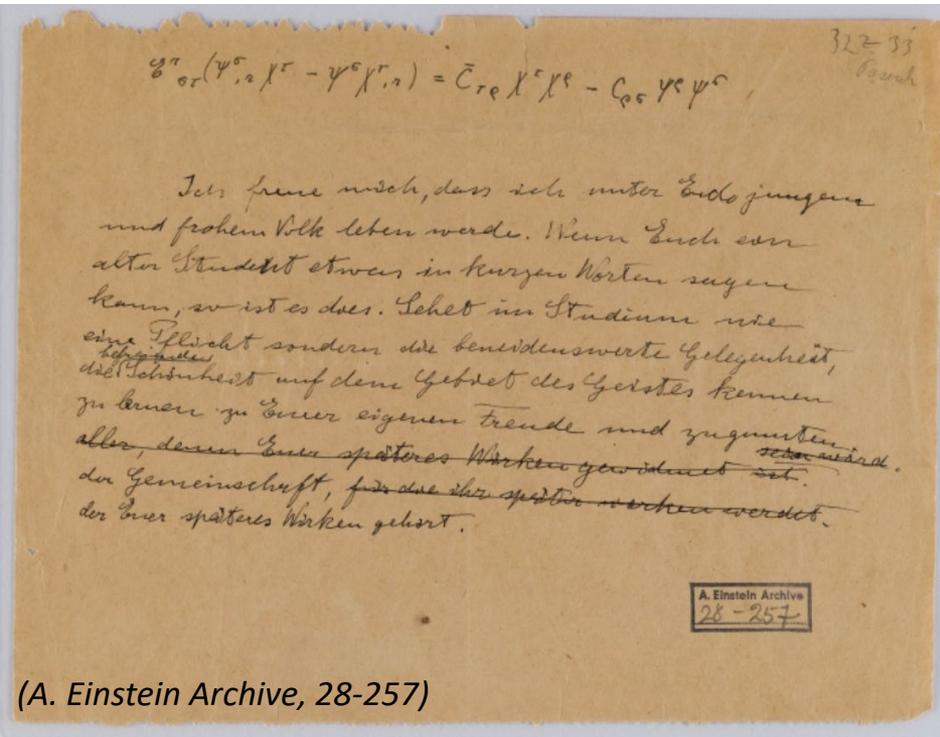
"We don't do what we do for praise – we do it because of a need to create and because of the pleasure it gives us. To me and to you, electronics is an art form: the feelings we have towards it must parallel those experienced by painters, sculptors, and musicians. "

Lettera di Edward Fairstein a Sergio Cova, Professore Emerito, Politecnico di Milano.

Ed Fairstein è stato un pioniere nello sviluppo dell'elettronica per spettrometria delle radiazioni, alla quale ha lavorato sin dagli inizi, cioè da quando nel 1944 ancora laureando aveva accettato di collaborare al progetto Manhattan del governo USA. Fairstein ha ideato e prodotto forse la più bella elettronica di amplificazione e filtraggio di impulsi per spettrometria che si sia mai vista, lavorando prima nello Oak Ridge National Laboratory e poi nella industria Tennelec, da lui fondata e sviluppata. Gli americani dicevano che per questa elettronica la Tennelec era come la Ferrari per le automobili e Edward Fairstein era come Enzo Ferrari...



Il mio augurio...



(A. Einstein Archive, 28-257)

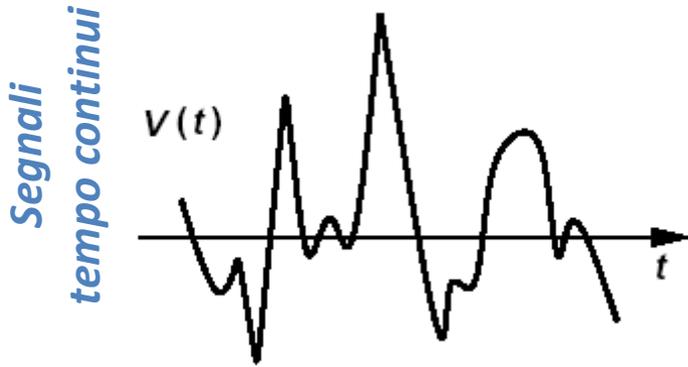
«SONO CONTENTO DI VIVERE IN MEZZO A VOI CHE SIETE GIOVANI E FELICI. SE UN VECCHIO STUDENTE POTESSE IN BREVE DIRVI QUALCOSA, LE PAROLE SAREBBERO QUESTE: NON CONSIDERATE MAI LO STUDIO COME UN DOVERE, MA COME L'INVIDIABILE OCCASIONE DI CONOSCERE LA LIBERANTE BELLEZZA NELLO SPIRITO, PER LA VOSTRA GIOIA PERSONALE E A VANTAGGIO DELLA COMUNITÀ ALLA QUALE APPARTIENE LA VOSTRA OPERA FUTURA»

discorso tenuto da Albert Einstein alla Princeton University alle matricole nel dicembre del 1933

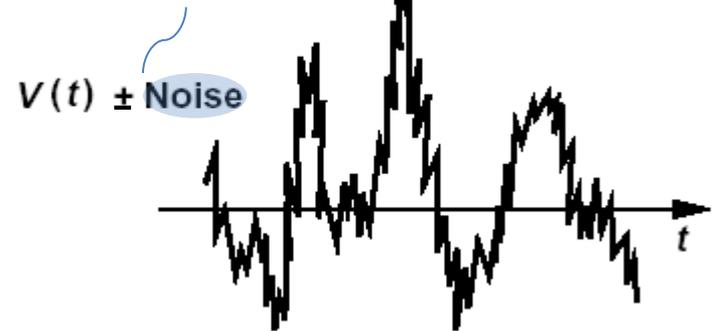
Never regard your study as a duty, but as the enviable opportunity to learn the liberating beauty of the intellect for your own personal joy and for the profit of the community to which your later work will belong

SEGNALI ANALOGICI E DIGITALI

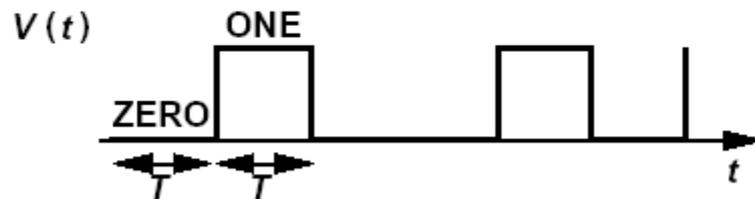
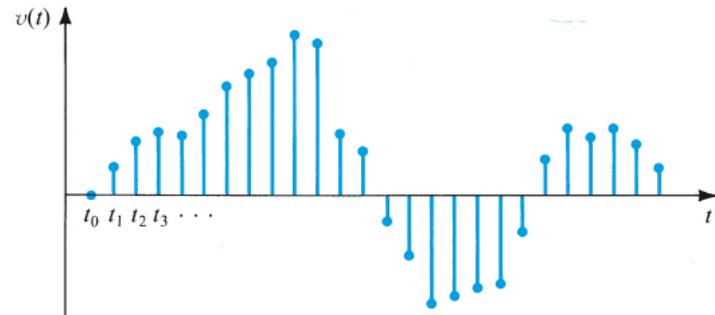
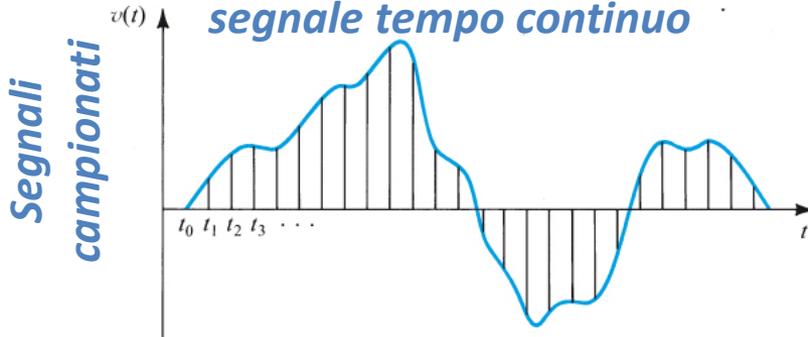
Segnali analogici



variabile casuale

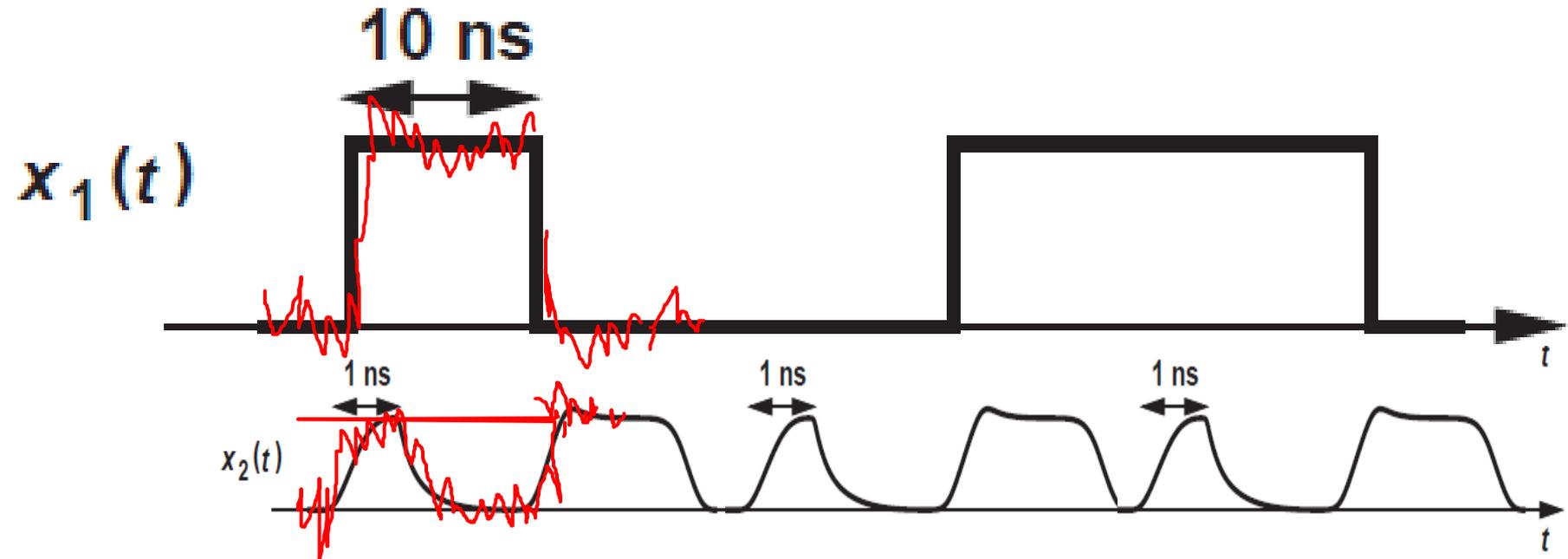
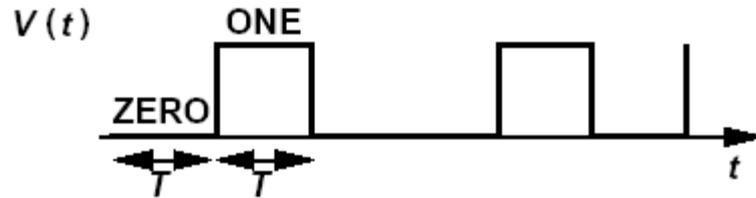


campionamento di un segnale tempo continuo

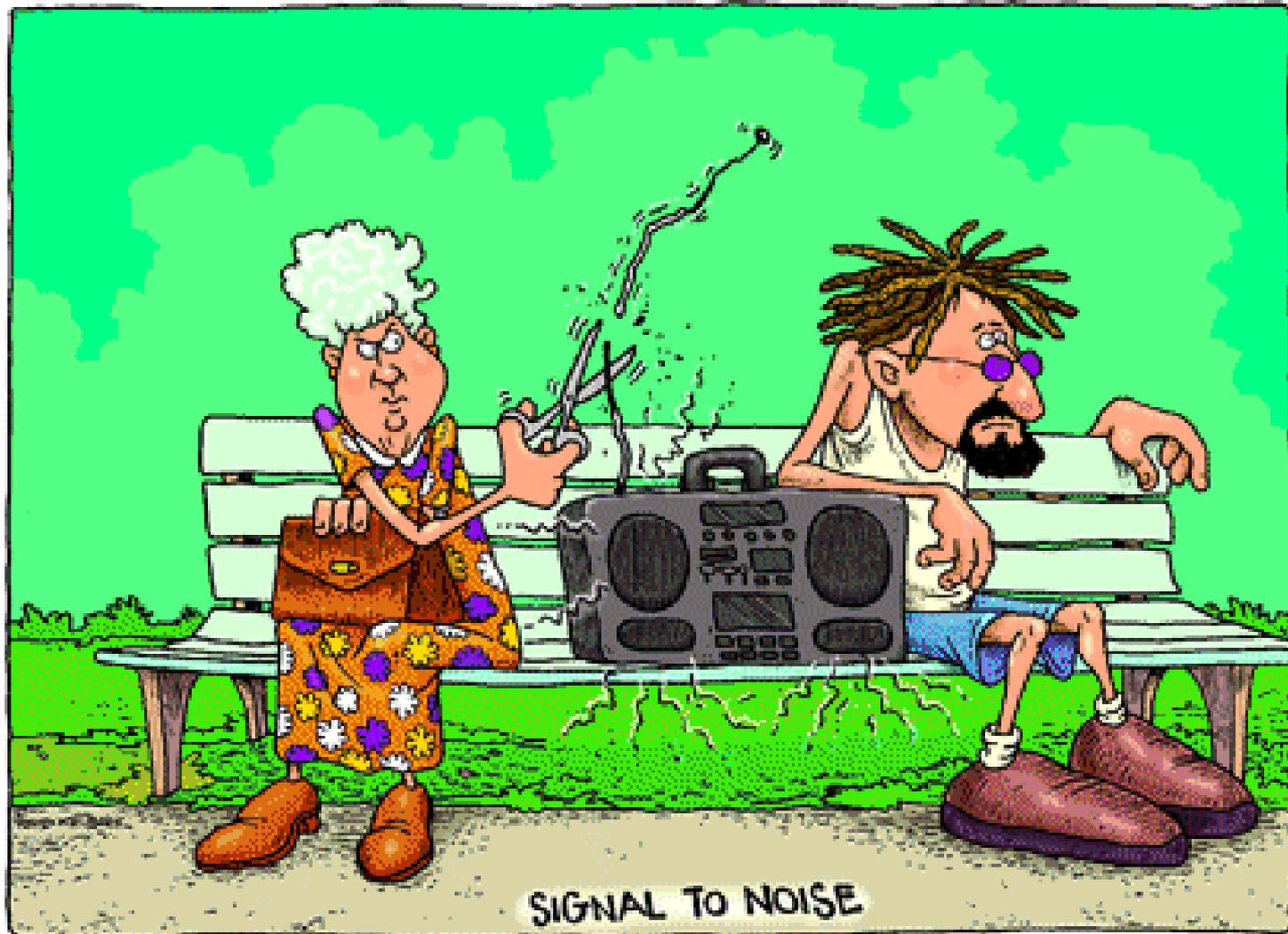


SEGNALI ANALOGICI E DIGITALI

Segnali
digitali



SEGNALE E RUMORE



CENNI DI PROBABILITA' E STATISTICA

In statistica, la funzione che a ogni valore di una variabile associa la sua frequenza (in genere normalizzata a 1, ovvero la frequenza divisa per la numerosità della popolazione) prende il nome di **distribuzione** della variabile.

Il primo indicatore sintetico di una distribuzione è la **media** (aritmetica) della variabile, \bar{x} :

$$\bar{x} = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N x_i$$

Una caratteristica importante di una distribuzione è, oltre alla sua “tendenza centrale” (rappresentata tramite la media aritmetica), la sua più o meno grande “dispersione”. Per dispersione si intende lo sparpagliamento dei dati su valori distanti dal valore centrale di riferimento (la media). La **varianza** si ottiene sommando i quadrati degli scarti dalla media:

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2$$

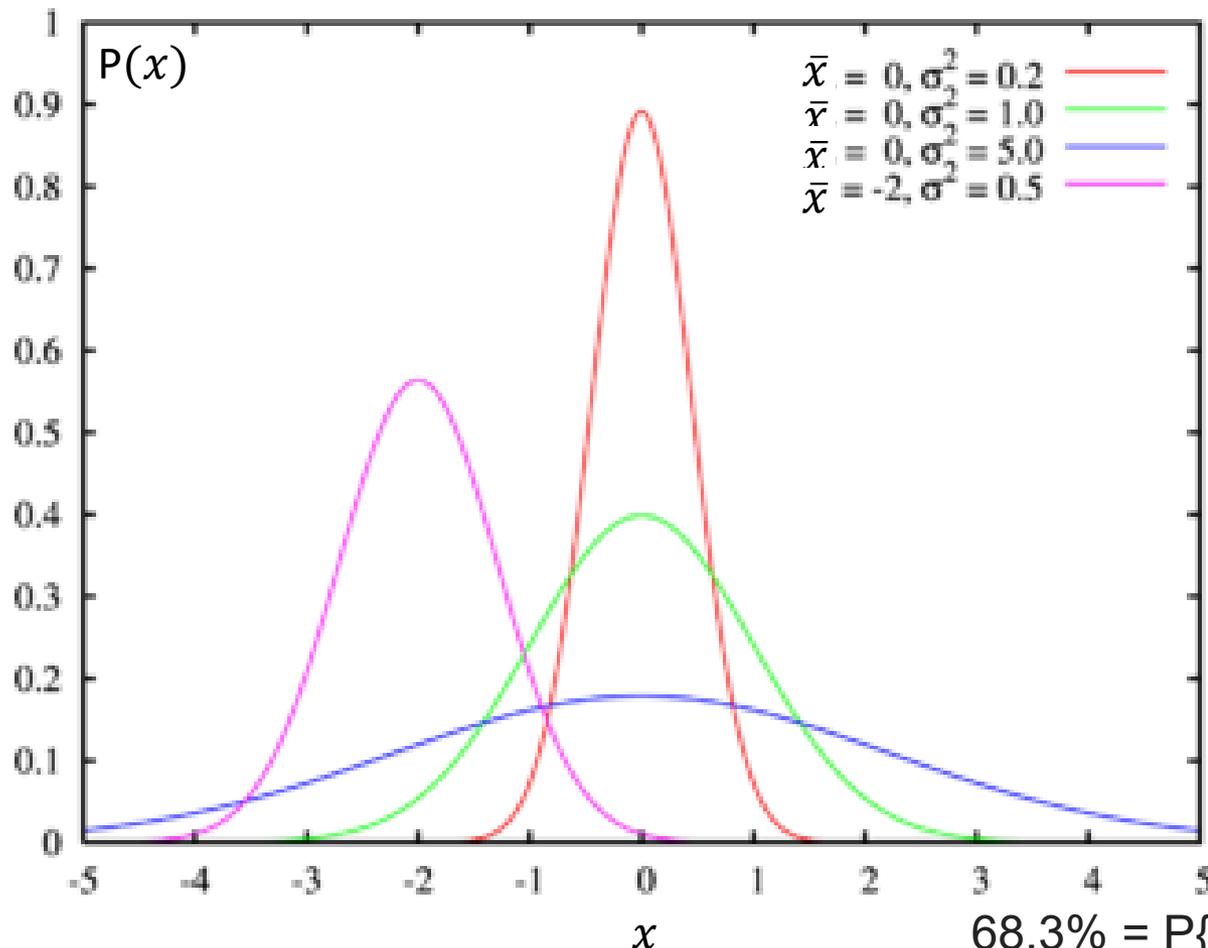
La varianza è quindi sempre positiva e si annulla se e solo se tutti i valori della variabile x coincidono con la sua media e la “variabile” è una costante su tutti gli individui della popolazione.

$$\sigma^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2 = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(x_i)^2 - 2\bar{x}x_i + (\bar{x})^2] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i)^2 - \frac{1}{N} 2\bar{x} \sum_{i=1}^N [x_i] + \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N [(\bar{x})^2] = \frac{1}{N} \sum_{i=1}^N (x_i)^2 - [(\bar{x})^2]$$

Il **valore quadratico medio (root mean square – r.m.s.)** o **deviazione standard** è la radice quadrata della varianza:

$$\sigma_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^N (x_i - \bar{x})^2}{N}}$$

CENNI DI PROBABILITA' E STATISTICA



$$P(x) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}\sigma} e^{-\frac{(x-\bar{x})^2}{2\sigma^2}}$$

media (aritmetica) della variabile, \bar{x}

varianza σ^2

$$68,3\% = P\{\bar{x} - 1,00 \sigma < X < \bar{x} + 1,00 \sigma\}$$

$$95,0\% = P\{\bar{x} - 1,96 \sigma < X < \bar{x} + 1,96 \sigma\}$$

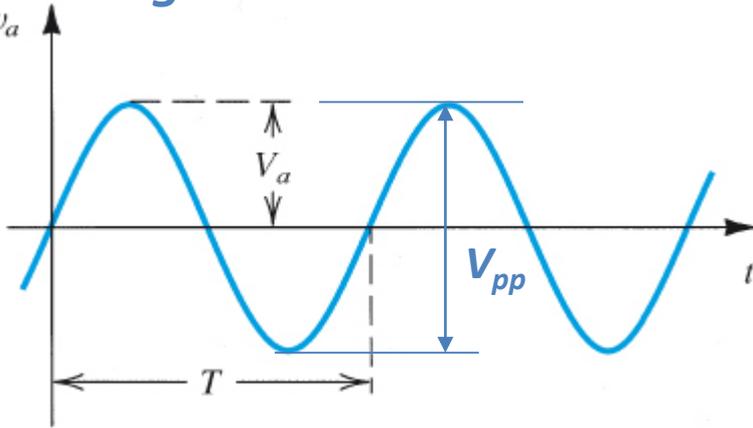
$$95,5\% = P\{\bar{x} - 2,00 \sigma < X < \bar{x} + 2,00 \sigma\}$$

$$99,0\% = P\{\bar{x} - 2,58 \sigma < X < \bar{x} + 2,58 \sigma\}$$

$$99,7\% = P\{\bar{x} - 3,00 \sigma < X < \bar{x} + 3,00 \sigma\}$$

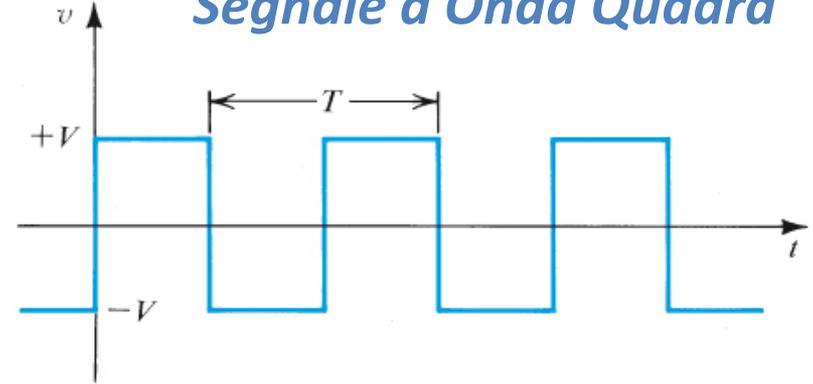
SEGNALI NEL DOMINIO DEL TEMPO E DELLA FREQUENZA

Segnale sinusoidale



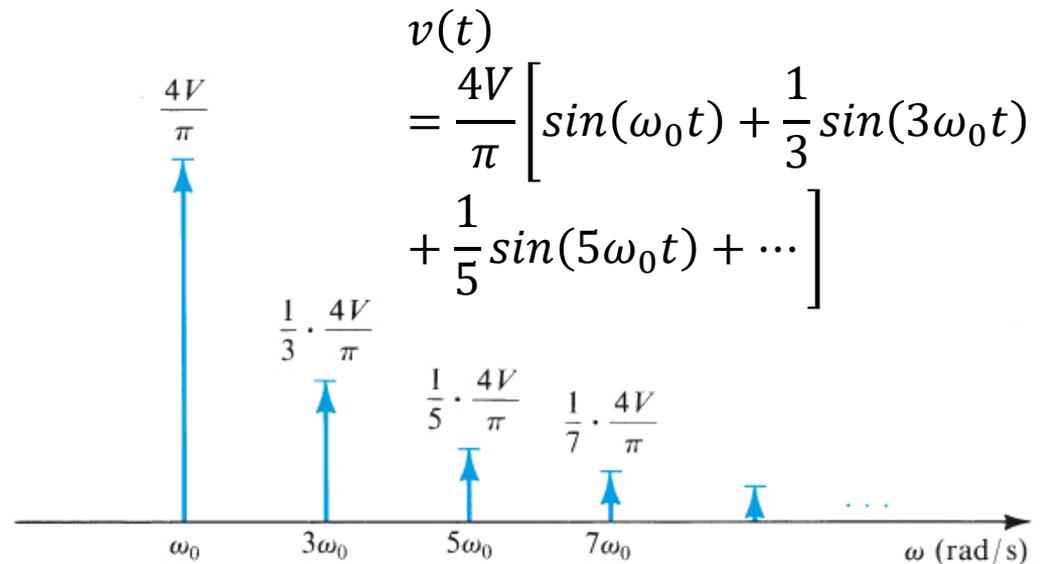
- ✓ Ampiezza, V_a
- ✓ Periodo, T
- ✓ Frequenza, $f=1/T$
- ✓ Pulsazione angolare, $\omega=2\pi f=2\pi/T$
- ✓ Fase
- ✓ Ampiezza picco-picco, $V_{pp}=2V_a$

Segnale a Onda Quadra



Duty cycle: rapporto tra la durata del tempo in cui il segnale e' «alto» e il periodo totale del segnale ad onda quadra, tipicamente in percentuale

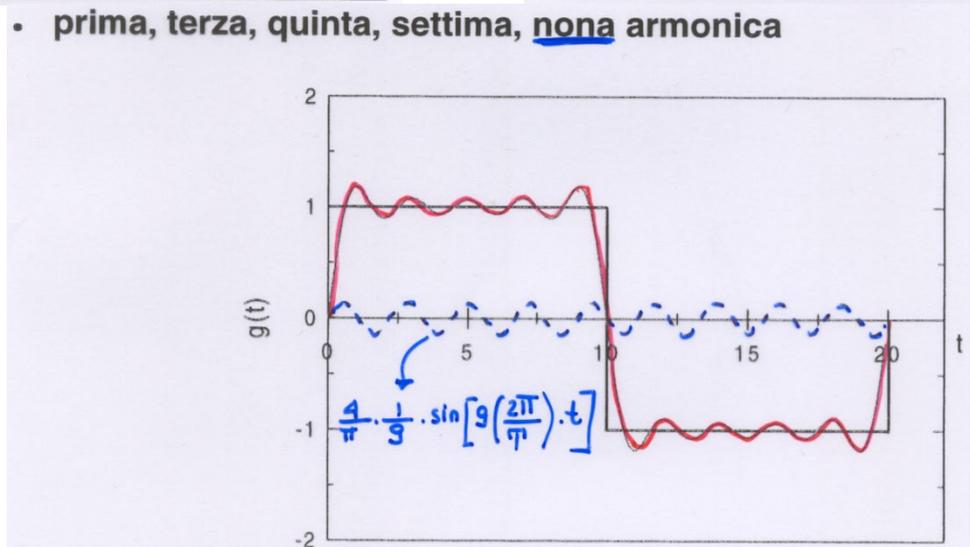
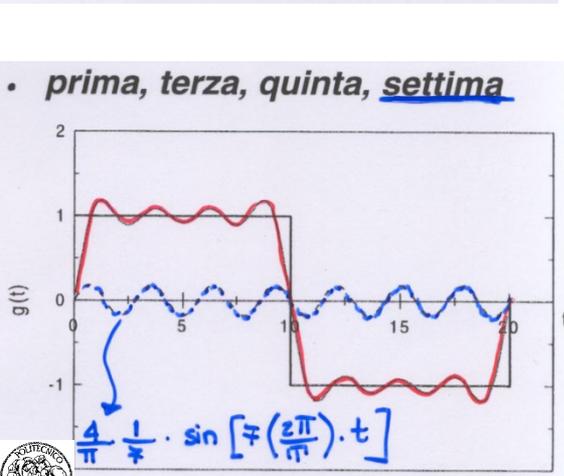
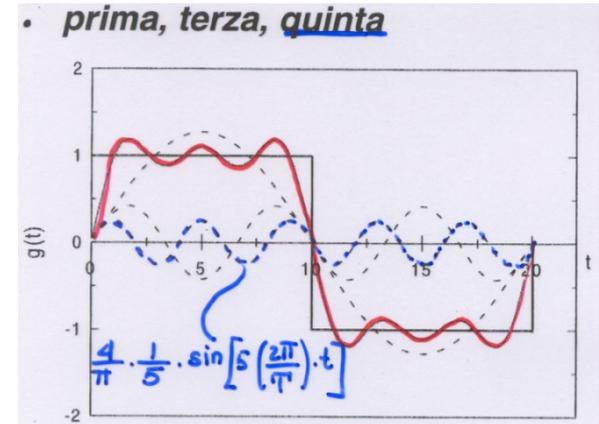
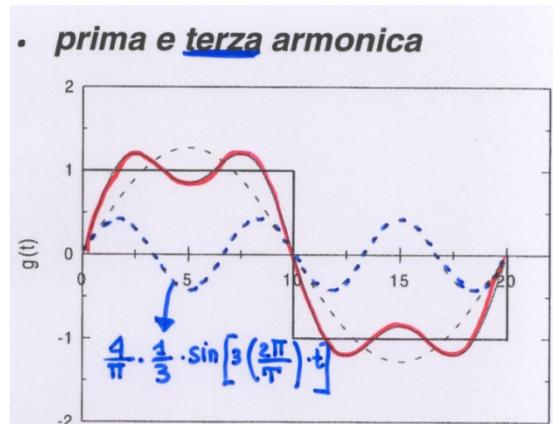
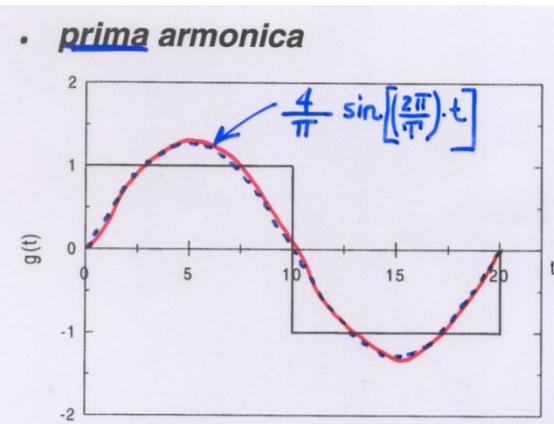
Serie di Fourier e Spettro in frequenza



SEGNALI NEL DOMINIO DEL TEMPO E DELLA FREQUENZA

Ricostruzione di un'onda quadra dai termini della Serie di Fourier

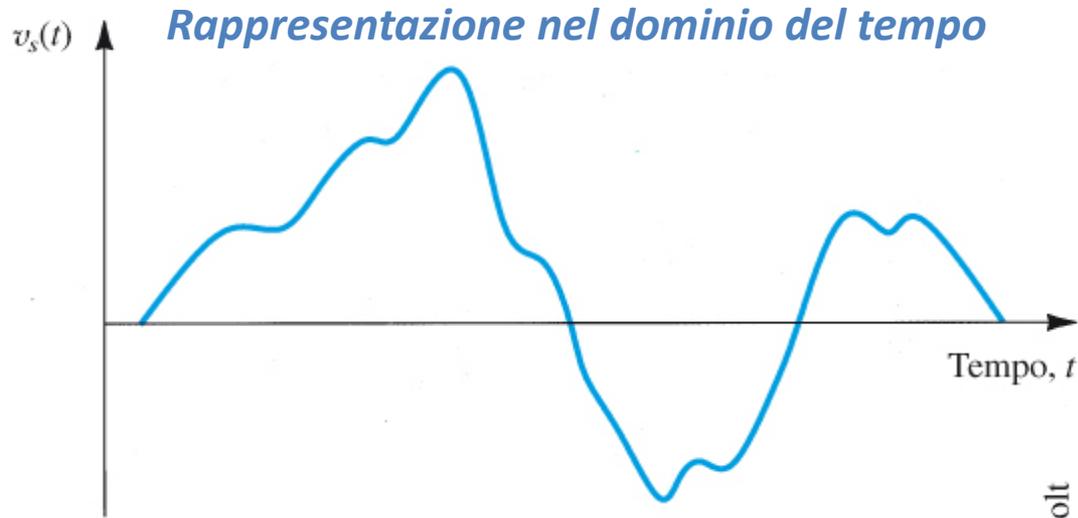
$$v(t) = \frac{4}{\pi} \left[\sin(\omega_0 t) + \frac{1}{3} \sin(3\omega_0 t) + \frac{1}{5} \sin(5\omega_0 t) + \frac{1}{7} \sin(7\omega_0 t) + \frac{1}{9} \sin(9\omega_0 t) + \dots \right]$$



SEGNALI NEL DOMINIO DEL TEMPO E DELLA FREQUENZA

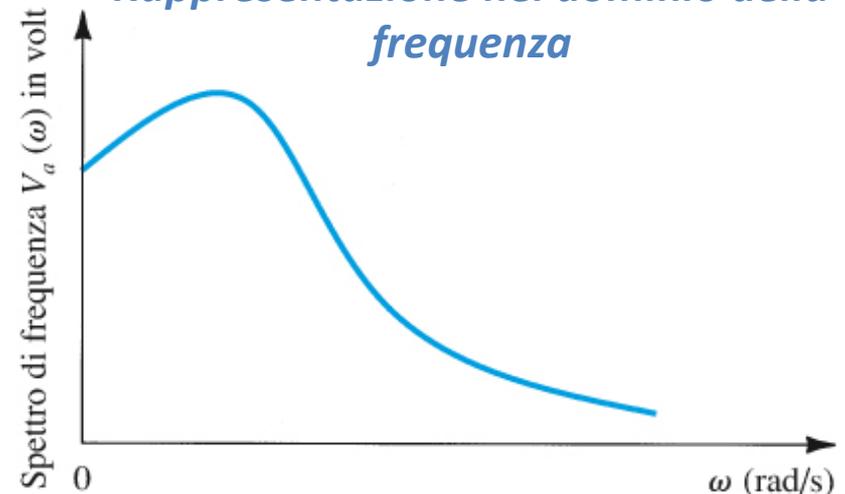
Segnali non periodici

Rappresentazione nel dominio del tempo



Banda di un segnale: intervallo di frequenze alle quali le ampiezze del suo spettro sono di valore significativo

Rappresentazione nel dominio della frequenza

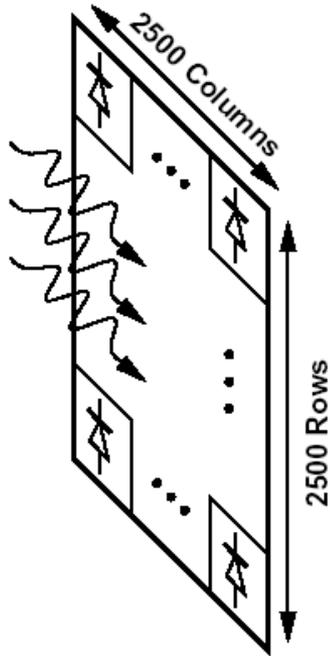




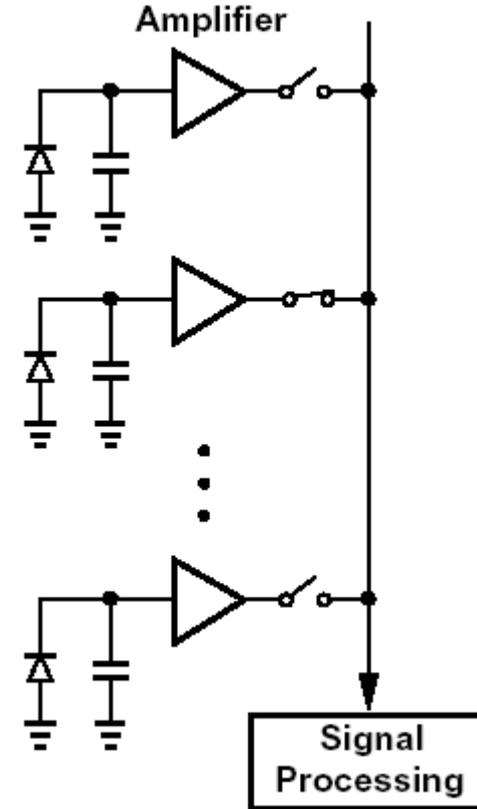
FOTOCAMERA DIGITALE



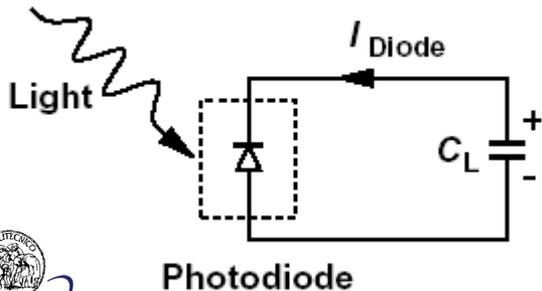
Matrice monolitica di sensori



Catena di elaborazione (una per colonna)



Sensore per la conversione della luce in un segnale elettrico



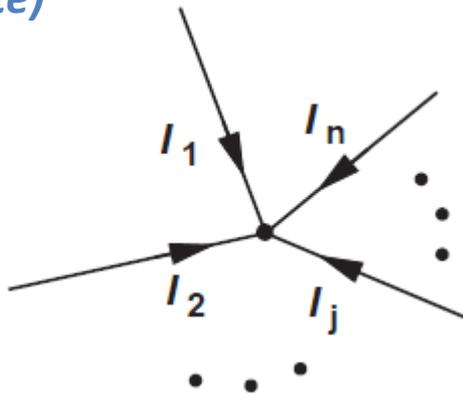
Pre-elab. analogica, conversione A/D, elaborazione digitale



LEGGI DI KIRCHHOFF

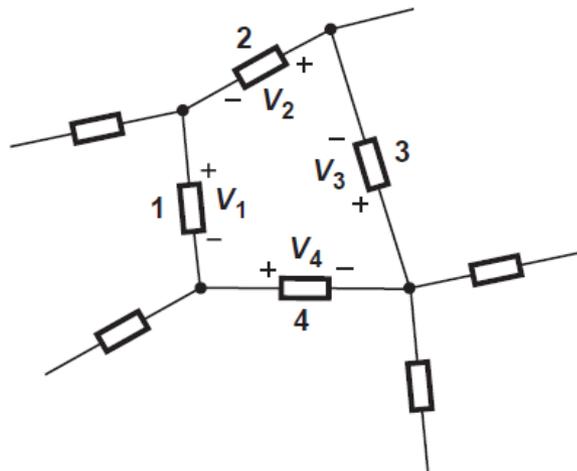
Le leggi di Kirchhoff, formulate da Gustav Robert Kirchhoff (fisico e matematico tedesco) nel 1845 a seguito di esperimenti empirici, precedono storicamente le ben più complesse e generali equazioni di Maxwell.

- ✓ **Legge di Kirchhoff delle correnti (conservazione della carica, i.e. solenoidalità della corrente)**



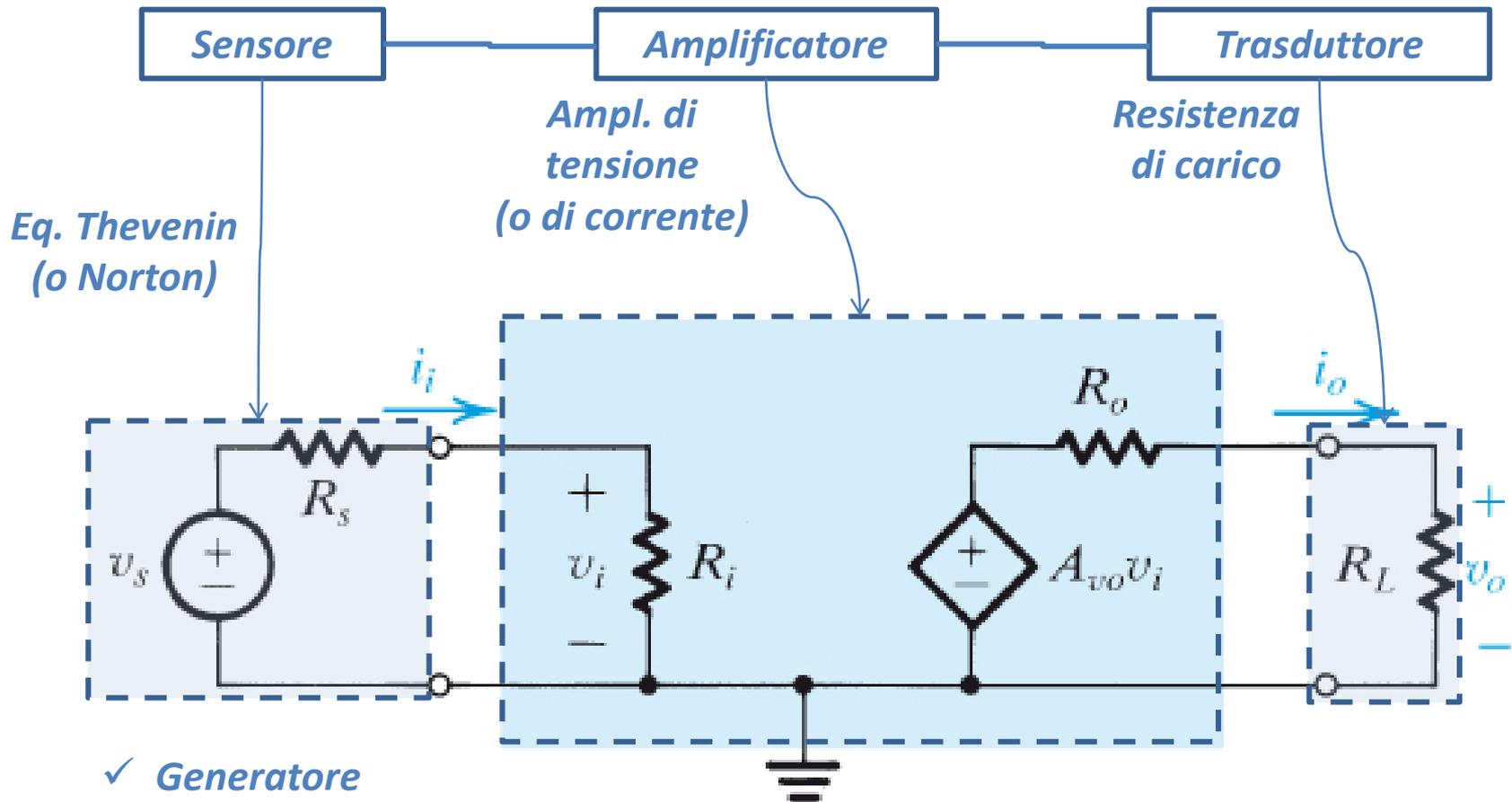
$$\sum_j I_j = 0$$

- ✓ **Legge di Kirchhoff delle tensioni (conservazione della forza elettromotrice)**



$$\sum_j V_j = 0$$

CIRCUITO EQUIVALENTE



*Eq. Thevenin
(o Norton)*

*Ampl. di
tensione
(o di corrente)*

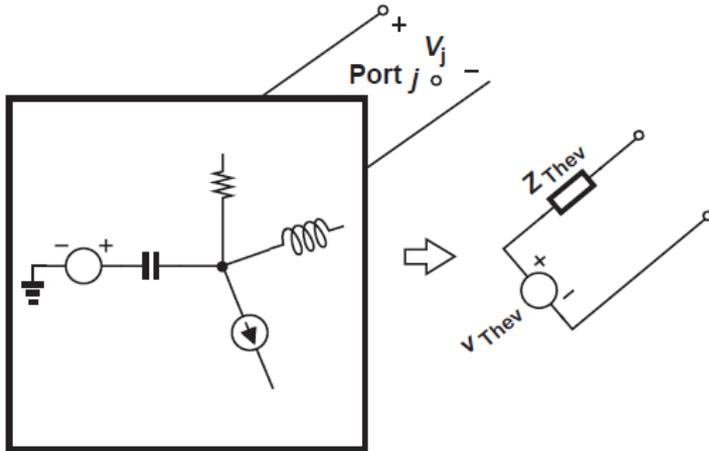
*Resistenza
di carico*

- ✓ *Generatore equivalente*
- ✓ *Resistenza equivalente*

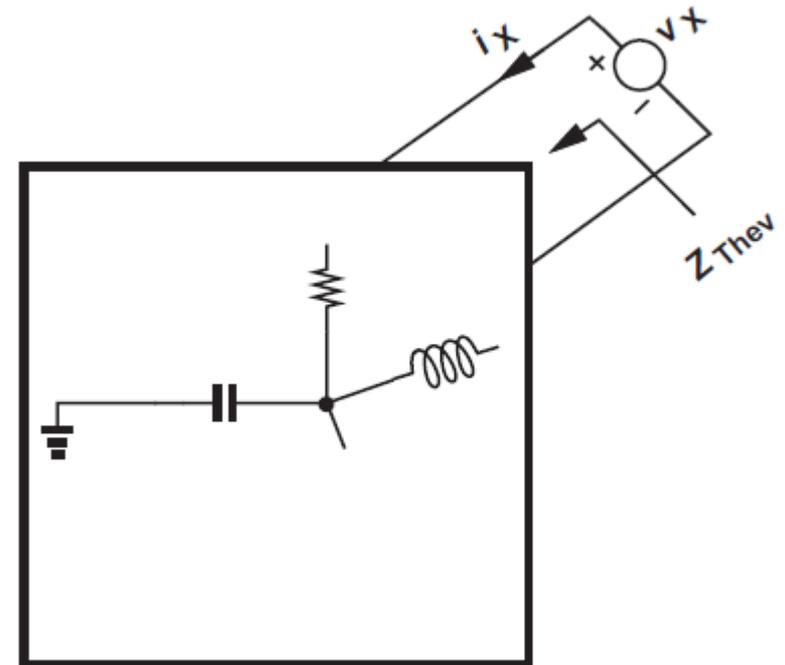
- ✓ *Resistenza di ingresso*
- ✓ *Resistenza di uscita*
- ✓ *Guadagno di tensione (corrente)*

EQUIVALENTE THEVENIN E NORTON

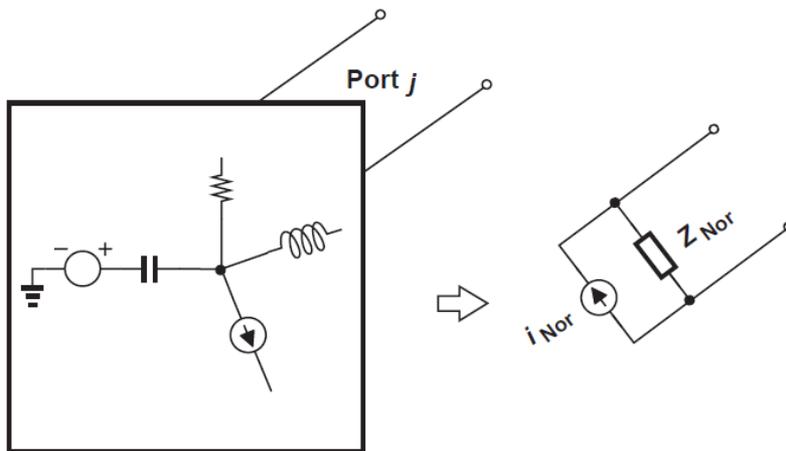
✓ Circuito Equivalente Thevenin



✓ Calcolo della resistenza equivalente

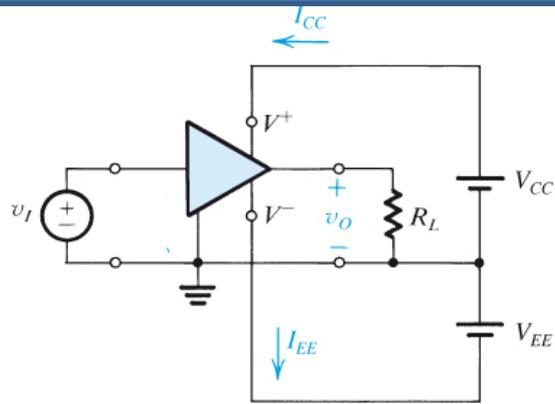


✓ Circuito Equivalente Norton

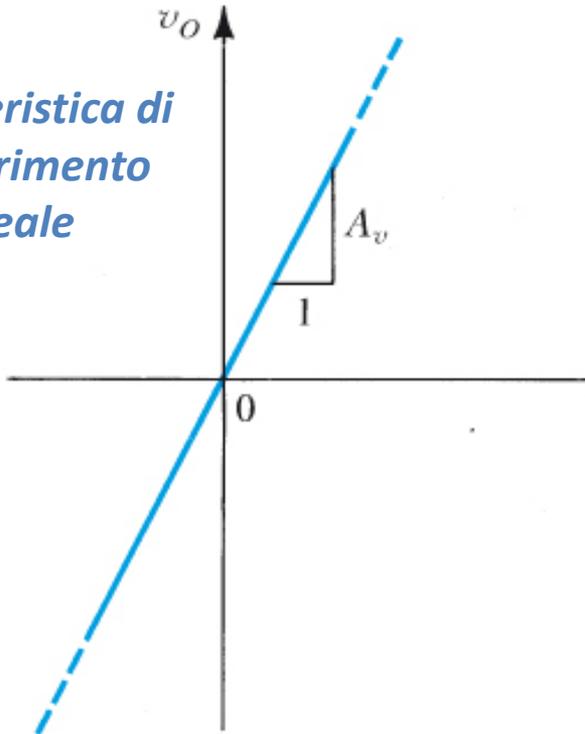


$$Z_{Nor} = Z_{Thev}$$

AMPLIFICATORE



Caratteristica di trasferimento ideale



Caratteristica di trasferimento reale

